

По виду графиков на рисунках 5–8 видно, что при решении указанной выше задачи оптимизации время движения снизилось на 7–10 с по сравнению с фактически реализуемыми в настоящее время режимами движения, а интенсивность колебаний сосуда на упругом канате существенно уменьшилась, снижая тем самым горизонтальные нагрузки на армировку ствола. В свою очередь, снижение нагрузок до уровня ниже максимально допустимого за счет оптимизации процесса движения позволяет разрешить дальнейшее повышение скорости для увеличения производительности подъема.

**Выводы.** В задаче оптимизации движения шахтных подъемных установок получены диаграммы, позволяющие либо существенно уменьшить расход энергии, либо заметно уменьшить время подъема. В последнем случае удается также ограничить величины ускорения и рывка при движении подъемного сосуда, что приводит к уменьшению колебаний подъемного сосуда и каната.

**Список литературы:** 1. *Масляный А. С.* Оптимальная динамика статически уравновешенных подъемных установок / *А. С. Масляный* // Применение вычислительной техники и математических методов в автоматизации горнорудного и металлургического производства. – К.: Техніка. – 1968. – С. 20–29. 2. *Масляный А. С.* Оптимальная динамика статически неуравновешенных подъемных установок / *А. С. Масляный* // Применение вычислительной техники и математических методов в автоматизации горнорудного и металлургического производства. – К.: Техніка. – 1968. – С. 29–44. 3. *Масляный А. С.* Синтез оптимального управления шахтными подъемными установками / *А. С. Масляный, Ю. В. Михлин, Г. И. Малецкая* // Ордена Ленина институт кибернетики АН УССР. – К.: ПРЕПРИНТ–77–26, – 1977. – 32 с. 4. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов / *Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе [и др.]*. – М.: Наука. – 1983. – 393 с. 5. *Ильин С. Р.* Об устойчивости движения грузов в упругих проводниках при пространственном расположении точек крепления канатов для многоканатного подъема / *С. Р. Ильин* // Publ. Techn. Univ. Heavy Ind. – Miskolc. – Ser. A – Vol. 35, Fasc. 3–4. – 1981. – P. 197–204. 6. *Ильин С. Р.* Влияние параметров диаграмм скорости вращения подъемных машин на динамические усилия в канатах и усталостные явления в элементах армировки ствола / *С. Р. Ильин* // Стальные канаты № 8. Экология. – Одесса. – 2010. – С. 56–68. 7. *Белобров В. И.* Динамика шахтных подъемных установок / *В. И. Белобров, В. А. Дзензерский, В. И. Самуся [и др.]* – Днепропетровск: Изд. Днепропетровского университета. – 2000. – 380 с.

*Надійшла до редколегії 15.09.2011*

УДК 62-526

**В. Я. КОПЦ**, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь;

**Ю. А. ОСИНСКИЙ**, доц. каф. АТПП СевНТУ, г. Севастополь;

**О. В. ФИЛИПОВИЧ**, канд. техн. наук, доц. каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь;

**М. И. ГАРМАТЮК**, инженер каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ШАГОВОГО ПНЕВМОПРИВОДА ПОВОРОТНОГО ДЕЙСТВИЯ

Розглянуті структура, параметри, конструкція та основні принципи функціонування експериментальної установки для дослідження динамічних характеристик коливального крокового пневматичного привода поворотної дії. Наведені приклади порівняння експериментальних даних з даними, які отримані в результаті моделювання динаміки привода.

Рассмотрены структура, параметры, конструкция и основные принципы функционирования экспериментальной установки для исследования динамических характеристик колебательного шагового пневматического привода поворотного действия. Приведены примеры сравнения экспериментальных данных с данными, полученными в результате моделирования динамики привода.

The structure, parameters, design and main principles of functioning of experimental station for research of dynamic characteristics of an oscillatory step-by-step rotary pneumodrive are considered. Examples of comparison of experimental data with the data received as a result of modeling of dynamics of a drive are given.

**Введение.** Рассматриваемая экспериментальная установка, разработанная на кафедре автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета, предназначена для исследования динамических характеристик колебательного шагового пневматического привода поворотного действия (далее – КШПП). КШПП имеют ряд преимуществ перед другими типами пневмоприводов, осуществляющих позиционирование в большом числе фиксированных положений, например, большее число точек позиционирования и большую жесткость при фиксации достигнутого положения, а также возможность осуществления контурного управления при необходимости перемещения исполнительного органа по заданной траектории с заданной скоростью. Целью данной работы является описание конструкции и принципов функционирования установки, методики проведения исследований, а также сравнительный анализ эмпирических и теоретических результатов.

**Описание принципов функционирования установки.** Общий вид установки показан на рис. 1.

Установка расположена на столике, к основанию которого прикреплена массивная плита 1 для исключения воздействия различных случайных факторов (например, вибрации) на результаты измерений.

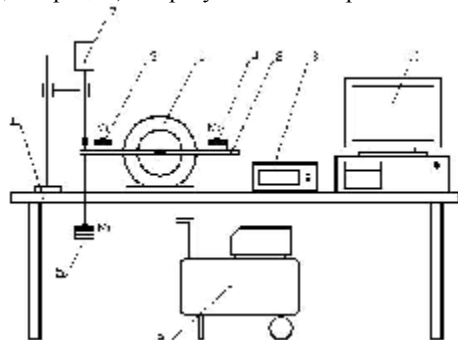


Рис. 1 – Общий вид установки

На плите установлен КШПП 1, к выходному валу которого прикреплен шкив с планкой 2 для установки грузов 3, 4, 5 различной массы. Грузами 3 и 4 равной массы  $M_1 = M_2$  осуществляется регулировка момента инерции системы без увеличения момента сопротивления, который остается неизменным. Груз 5 массой  $M_3$ , расположенный от оси вращения на определенном расстоянии (плече), предназначен также и для изменения момента сопротивления. На определенном расстоянии от центра выставлен измерительный наконечник растрового преобразователя 7, установленного в стойке и производящего измерения перемещений выходного вала привода. Питание системы сжатым воздухом и задание требуемой величины давления в магистрали осуществляется переносной пневматической системой 9, включающей компрессор, блок подготовки воздуха и ресивер. Блок 8, состоящий из двух частей, является комплексной системой управления и обработки результатов измерения. Первая его часть – программируемый микроконтроллер (МК) серии BC440, предназначенный для осуществления управления мембранными приводами КШПП как в непрерывном, так и в ручном пошаговом режимах. Основным элементом второй части (счетного устройства) является 8-разрядный высокопроизводительный микроконтроллер ATmega8, к которому присоединяется растровый преобразователь и кнопки управления. Подготовленные данные передаются на персональный компьютер (ПК) 10 по последовательному интерфейсу RS232, при этом формируется текстовый файл результатов.

Для управления процессами преобразования и записи информации предусмотрены кнопки «Сброс» и «Запись». При нажатии на кнопку «Сброс» происходит запуск счетчика в режиме ожидания. При нажатии на кнопку «Запись» МК выдает подготовленные данные на ПК. Обработка эксперимен-

тальных данных, в частности, преобразование линейного перемещения штока преобразователя 7 в угловую величину поворота ведомого вала привода, осуществляется в среде Maple.

Конструкция КШПП представлена на рис. 2 [1].

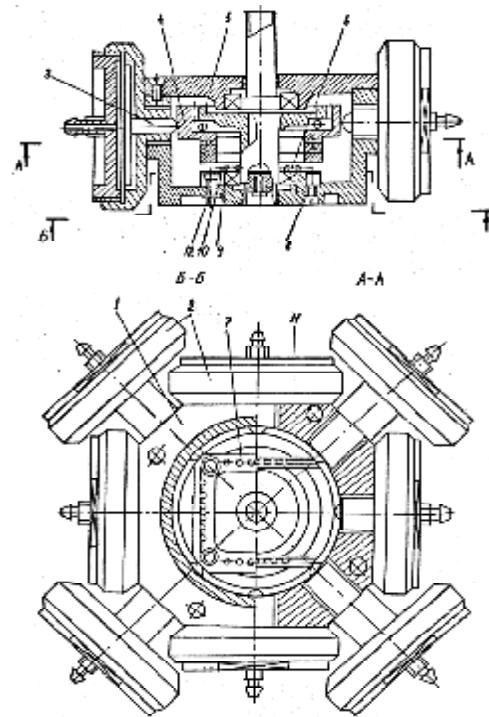


Рис. 2 – Конструкция КШПП

Он состоит из корпуса 1 с восемью мембранными приводами 2, расположенными под углом  $45^\circ$  относительно друг друга. Штоки 3 приводов 2 контактируют с шестерней внутреннего зацепления 4, выполняющей роль ведущего элемента. В свою очередь шестерня 4 находится в зацеплении с валом-шестерней 5, установленной в подшипниковых опорах 6. В отличие от волновой передачи, ведущий элемент выполнен жестким, а аналогия этих передач прослеживается в том, что шестерня 4 может совершать только плоскопараллельные круговые колебания. От проворота вокруг собственной оси она фиксируется крестообразной муфтой 7 и прижимной планкой 8 через шарики 9, которые расположены в сепараторах 10 и 11. Люфт всей системы выбирается за счет затяжных винтов 12.

Последовательной подачей воздуха в приводы 2 обеспечиваются плоскопараллельные круговые колебания шестерни 4, преобразующиеся во вращение вала-шестерни 5 вокруг собственной оси.

**Теоретический анализ динамических характеристик КШПП.** Контакт ведущего и ведомого элементов происходит по двум точкам. При совершении ведущим элементом под действием сил, создаваемых пневмоприводами, плоскопараллельных круговых колебаний за счет контакта в одной из точек ведомый элемент поворачивается на угол  $g$ . При совершении одного полного круга колебаний ведущего элемента ведомый элемент поворачивается на

угол  $g^{ок} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} 2p$ , где  $z_1$  и  $z_2$  – числа зубьев ведущего и ведомого колес

соответственно. Диаметр  $d$  окружности колебаний ведущего элемента равен  $d = 2r$  и соответствует максимальному зазору между ведущим и ведомым элементами, причем  $d = D_1 - D_2 = (z_1 - z_2)m_z$ . Делительные диаметры ведущего и ведомого элементов равны:  $D_1 = z_1 m_z$ ,  $D_2 = z_2 m_z$ , где  $m_z$  – модуль зацепления. Коэффициент передачи  $i$  определяется соотношением

$i = \frac{g^{ок}}{x_i^{ок}} = \frac{2}{D_2}$ , где  $x_i^{ок}$  – длина окружности колебаний ведущего элемента равная

$x_i^{ок} = p d = p(z_1 - z_2)m_z$ .

Теоретические динамические характеристики КШПП оценивались при помощи уравнения движения, выведенного на основании уравнения Лагранжа второго рода, и подробно приведенного в [2]. Из-за ограниченности объема статьи вывод здесь не приводится. Окончательно это уравнение имеет вид:

$$\frac{d^2 a}{dt^2} \left[ m_1 + \frac{J i^2}{1 - K} \right] = F_{t\text{рез}} - \frac{M_c i}{1 - K},$$

где  $K = \frac{(tg f_1 + tg f_2) f}{(f + tg f_2) tg f_1}$  (элементы, входящие в данную формулу, определены

в [2]),  $\frac{d^2 a}{dt^2}$  – вторая производная центрального угла  $a$ , определяющего величину смещения ведущего элемента относительно исходного положения;  $m_1$  – масса ведущего элемента;  $r$  – радиус окружности колебаний ведущего элемента, соответствующий половине максимального зазора между ведущим и ведомым элементами;  $J$  – момент инерции выходного вала с присоединенными к нему элементами;  $M_c$  – момент сопротивления, действующий на выходном валу ( $M_c = m_z \cdot b, m_z = M_3$ ,  $b$  – плечо);  $F_{t\text{рез}}(a)$  – результирующая сила, действующая в направлении движения ведущего элемента.

Результирующая сила  $F_{t\text{рез}}(a)$  зависит от величины текущего угла поворота ведущего элемента и в общем случае определяется из выражения

$$F_{t\text{рез}} = F_{t\text{рез}} + F_{mp\Sigma}^{x_i},$$

где  $F_t$  – сила, создаваемая пневмоприводами и действующая в направлении движения ведущего элемента;  $F_{mp\Sigma}^{x_i}$  – суммарная сила трения, также действующая в направлении противоположном движению ведущего элемента (в выражение для определения данной силы входит коэффициент трения  $f_p$ , создаваемого при взаимодействии штоков мембранных приводов и ведущим элементом).

Подробный вывод выражений для определения  $F_t$  и  $F_{mp\Sigma}^{x_i}$  при различных законах управления и, следовательно, при различных вариантах перемещений, приведен в [2]. Кроме этого следует отметить, что при моделировании динамики КШПП учитывались термодинамические процессы в мембранных пневмоприводах, создающих усилие  $F_t$ , и инерционность коммутирующей аппаратуры.

**Сравнение теоретических и экспериментальных данных.** Приведем примеры сравнения динамических характеристик КШПП, полученных в результате численного решения уравнения движения и эмпирических, полученных по результатам опытных данных на рассматриваемой установке. Рассматриваются два возможных случая перемещения ведущего элемента привода (на  $22,5^\circ$  и  $45^\circ$ ), динамические характеристики определяются на одном шаге при одинаковых значениях исходных данных, указанных в таблице 1. Исходные данные, значения которых варьируются в зависимости от номера эксперимента, приведены в таблице 2.

Из всего множества проведенных в статье приведены результаты 6 экспериментов, которые в дальнейшем различаются по номерам. Для всех случаев шток измерительного преобразователя устанавливался на расстояние, равное 0,02 м от оси вращения выходного вала КШПП. Примеры, показывающие зависимости угла поворота ведомого элемента КШПП от времени ( $g = g(t)$ ), полученные путем теоретических и экспериментальных исследований для различных вариантов исходных данных, приведены на рис. 3.

Отметим, что перемещение на  $22,5^\circ$  проводилось из состояния, при котором включен один мембранный привод в состояние, при котором включены два соседних привода одновременно. При перемещении на  $45^\circ$  из использовалось переключение двух соседних мембранных приводов.

Таблица 1 – Исходные данные для проведения экспериментальных и теоретических исследований

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Коэффициенты трения (зацепление $f$ /привода $f_p$ )	0,08/0,05
2.	Числа зубьев ведущего $z_1$ / ведомого $z_2$ колес	158/150
3.	Модуль зацепления $m_z$ , мм	0,0003
4.	Масса ведущего элемента $m_1$ , кг	0,522
5.	Собственный момент инерции ведомого элемента $J_2$ , Н·м <sup>2</sup> ;	0,00128
6.	Магистральное давление $P_M$ , МПа	0,6
7.	Абсолютная температура $T$ , К	290
8.	Коэффициенты расхода $\mu_1 / \mu_2$	0,6/0,2
9.	Диаметры проходных сечений подходящих магистралей $d_1 = d_2$ , м	0,0015
10.	Эффективные площади мембран пневмоприводов $S_1 = S_2$ , м <sup>2</sup>	0,022
11.	Максимальный ход штоков мембранных пневмоприводов $x_{sum}$ , м	0,0006
12.	Координаты, определяющие холостые объемы пневмоприводов $x_{01} = x_{02}$ , м	0,004
13.	Постоянные времени срабатываний коммуникационной аппаратуры $t_1 = t_2$ , с	0,0033

Рисунок 1 — Структурная схема системы регулирования частоты

Таблица 2 – Варьируемые исходные данные

№ п/п	Наименование параметра	Номер эксперимента					
		1	2	3	4	5	6
1.	Перемещение ведущего элемента, град	22,5	22,5	22,5	45	45	45
2.	Плечо (расстояние, на котором подвешен груз от центра вращения), $b$ , м	0,1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15
3.	Масса груза, $m_z = M_z$ , кг	0,34	0,34	0,17	0,34	0,17	0,64

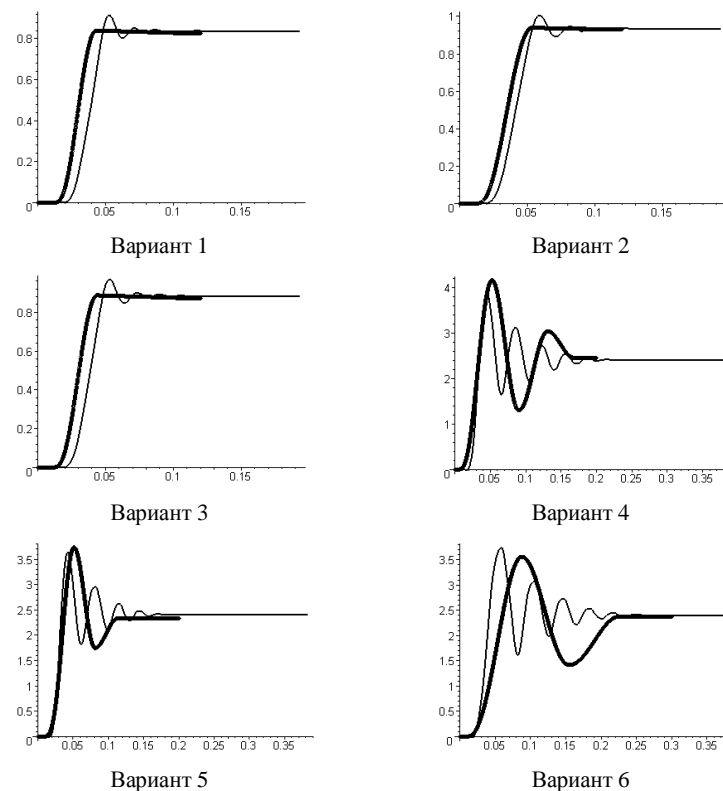


Рис. 3 – Графики зависимости угла поворота ведомого элемента от времени:  
— экспериментальные исследования; — теоретические исследования

**Выводы.** Сравнение результатов и экспериментальных исследований показывает, что при оценке времени перемещения в конечную точку наибольшее рассогласование теоретических и экспериментальных результатов составляет 18,9%, что вполне удовлетворительно для пневмоприводов. Средняя погрешность по времени перемещения составляет 11%.

Перспективами дальнейших исследований в данной области являются исследования управляемого движения выходного вала КШПП по оптимальному закону.

**Список литературы:** 1. *Konn B. Я.* Пневматические модульные манипуляторы в сборочном производстве / *В. Я. Konn* // Машиностроительное производство. Сер. Автоматизация производства, гибкие производственные системы, робототехника. – М. : ВНИИТУЭМР, 1989. – Вып. 1. – С. 52. 2. *Konn B. Я.* Колебательные шаговые пневмоприводы / *В. Я. Konn, Ю. А. Осинский,*

УДК 519.246.8

Т. С. ПЕТРУНИНА, студент, НТУ «ХПИ»

### ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ХАОТИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

При анализе хаотических временных рядов возникает проблема выявления и анализа их структурных свойств. Для решения задачи численного анализа структурных свойств исследуемых временных рядов применен метод Херста и метод сингулярного структурного анализа.

При аналізі хаотичних часових рядів виникає проблема виявлення структурних властивостей випадкового процесу. Для вирішення задачі аналізу властивостей хаотичних часових рядів застосований метод Херста та метод сингулярного структурного аналізу.

In the process of chaotic time series analysis, there arises a problem of detecting and analysis of their structural properties. Hurst exponent method and singular structural analysis method are used to solve the problem of analysis of structural of investigated properties chaotic time series.

**Введение.** Решение основных задач анализа временных рядов, а именно, их идентификации и прогнозирования, требует предварительного анализа структуры временного ряда с целью выбора его подходящей математической модели. Несмотря на наличие большого числа типовых моделей временных рядов, таких как «тренд + шум», модели авторегрессии – скользящего среднего и других, выбор адекватной модели остается достаточно сложной и плохо формализуемой задачей. Поэтому на первом этапе анализа целесообразно установить характер временного ряда, а именно, является ли он стохастическим или хаотическим, определиться с моделью тренда, и, в первую очередь, выявить наличие колебательных составляющих, проанализировать свойства ряда остатков. Подобная методика может быть использована и для обнаружения моментов изменения свойств временного ряда, например, изменения структуры модели.

**Постановка задачи.** Целью настоящей работы является анализ свойств временных рядов на основе использования показателя Херста и анализ структурных свойств временных рядов с использованием метода сингулярного спектрального анализа. В качестве объекта исследования использованы модельные и реальные временные ряды данных энергопотребления.

**Анализ структуры временного ряда методом Херста.** Показатель Херста часто используется для разделения стохастических и хаотических временных рядов [1]. Вычисления показателя Херста позволяет также оценить среднюю длину цикла временного ряда, под которой понимается интервал времени, по истечении которого исчезает влияние начальных условий.

Показатель Херста  $H$  характеризует отношение силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор). При проведении анализа используют следующие условия, позволяющие оценить характер временного ряда [2].

Значение  $H = 0.5$  соответствует полностью случайному временному ряду, аналогичному случайным смещениям частицы при классическом броуновском движении.

Случай  $H \in (0.5, 1]$  соответствует процессу с долгосрочными эффектами, характеризующийся существенной зависимостью от начальных условий. Такой ряд называется персистентным.

При  $H \in [0, 0.5)$  процесс обладает короткой памятью (краткосрочные эффекты) и представляет собой процесс детерминированного хаос. Такой временной ряд называется антиперсистентным.

Пример 1. Вычисление показателя Херста для временного ряда, который описывается авторегрессионным уравнением вида

$$X_k = a \cdot X_{k-1} + (1-a) \cdot \xi_k, \quad (1)$$

где  $a$  – параметр авторегрессионного уравнения ( $0 \leq a \leq 1$ ),

$X_0 = 0.1$  – начальное значение авторегрессионного уравнения,

$N = 100$  – количество значений временного ряда,

$k \in [0; N-1]$  – номер значения временного ряда,

$\xi \in N(0, \sigma^2)$  – вектор  $N$  независимых случайных чисел, каждое из

которых имеет нормальное распределение, где  $\sigma^2$  – дисперсия.

Уравнение (1) приведено к стандартизированному виду.

Проведение нескольких серий испытаний для выявления зависимости показателя Херста от изменения параметра авторегрессионного уравнения  $a$ . Построение семейства графиков, которые отражают изменение параметра  $a = 0.2$ ,  $a = 0.5$  и  $a = 0.7$  при постоянном значении дисперсии  $\sigma^2 = 10$ . Результаты расчетов по вычислению показателя Херста представлены на рис.1

Приведенный авторегрессионный временной ряд является стохастическим. С увеличением параметра  $a$  ( $0 \leq a \leq 1$ ) степень хаотичности временного ряда уменьшается.